



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Solange Cristine de Mello Ledezma	Adriana Vieira Branco de Oliveira
AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.
solange.mello@aes.com	adriana.oliveira@aes.com

Luiz Andrade	Lidiane dos Santos Chicarolli de Souza
AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.
luizacga@gmail.com	lidiane.santos@aes.com

Metodologia de M&V para a mensuração de ações de eficiência energética em comunidades de baixa renda

Palavras-chave

Cálculo de Economias
Eficiência Energética
Estatísticas
Medição e Verificação
Modelagem Matemática

Resumo

Este artigo trata do desenvolvimento de uma abordagem para o problema de Medição e Verificação (M&V) de ações de eficiência energética em comunidades de baixa renda. Essas comunidades impõem desafios para as atividades de verificação de economias principalmente devido à inexistência de registros históricos de qualquer natureza ou mesmo uma infraestrutura mínima de medição. Além disso, existem nessas comunidades fatores adicionais não ligados a economias de energia, tais como aspectos ligados à percepção de melhoria social, que condicionam o sucesso e sustentabilidade dessas ações. Como proposta para solução da questão é apresentada uma metodologia estatística que se apoia nas diretrizes do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance* (PIMVP), para tratamento das economias e para desenvolvimento de modelos de previsão de consumo através de regressões lineares múltiplas, que incorporam como variáveis explicativas aspectos socioeconômicos, ambientais, e técnicos. Também é apresentada uma aplicação da

metodologia nas comunidades do município de São Paulo.

1. Introdução

A necessidade de Medição e Verificação (M&V) para cômputo de economias em projetos de eficiência energética resulta no desenvolvimento de modelos de consumo de referência (*baselinemodels*), os quais são essenciais para o correto cálculo dos ganhos energéticos decorrentes dos projetos. Essa questão é um ponto crítico em projetos de eficiência energética em comunidades de baixa renda, dada a inexistência de registros de consumos prévios às ações, o que inviabiliza inferências estatísticas de qualquer natureza dos consumos de *baseline*.

Existem algumas iniciativas e frameworks de medição e verificação descritos na literatura internacional, dentre os quais, se destaca o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance* (PIMVP). Este documento é uma das metodologias mais utilizadas para determinação de planos de medição e verificação. Contudo, o protocolo tem por finalidade básica servir de subsídio para a gestão de contratos de desempenho entre proprietários de edificações (comerciais e industriais) e empresas de eficiência, no que se refere a grandes *retrofits*, renovações e melhorias, situação que não corresponde à realidade das ações de eficiência realizadas em comunidades de baixa renda.

Por outro lado, uma análise do PIMVP permite afirmar que a construção de modelos matemáticos, baseados em estatística, e sua utilização para simulação de consumos pode suprir a necessidade de registros prévios, resultando em modelos de *baseline* passíveis de aplicação.

No presente artigo, buscando aderência às diretrizes básicas do PIMVP, apresenta-se uma metodologia de levantamento de dados e modelagem do consumo de referência, que possibilita o cálculo das economias provenientes de ações em comunidades de baixa renda. Esta metodologia foi desenvolvida com acompanhamento de procedimentos operacionais, que detalham as atividades de coleta e manipulação de dados pelos pesquisadores de campo, analistas e outros agentes do processo de M&V.

Este arcabouço técnico desenvolvido encontra-se em aplicação nas comunidades de baixa renda que foram beneficiadas com ações de eficiência energética da empresa AES Eletropaulo. A aplicabilidade do produto é direta para as distribuidoras do setor elétrico que atuam em melhorias e *retrofits* em comunidades de baixa renda e necessitam avaliar, *a posteriori*, os benefícios decorrentes de tais ações. Além disso, uma apuração mais refinada dos benefícios energéticos decorrentes dos projetos permite, futuramente, que os investimentos nessas comunidades sejam ainda melhor direcionados, aumentando a eficiência global do Programa de Eficiência Energética da ANEEL.

O conteúdo do artigo divide-se em seções, como descrito a seguir: Na segunda seção as atividades de eficiência em comunidades de baixa renda são sumariamente descritas; a terceira seção se dedica a uma revisão bibliográfica do tema em questão; a quarta seção corresponde à apresentação da metodologia proposta para o desenvolvimento de modelos de *baseline* para comunidades de baixa renda; a quinta seção apresenta resultados de uma aplicação da metodologia proposta em comunidades do município de São Paulo; na sexta seção são apresentadas as conclusões.

2. Desenvolvimento

2. AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM COMUNIDADES DE BAIXA RENDA

De acordo com o Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) um percentual da Receita Operacional Líquida (ROL) das empresas de distribuição de energia elétrica deve ser empregado em programas de eficiência energética. Para uma descrição detalhada do histórico da evolução

do PEE e de todo o processo de desregulamentação do setor elétrico brasileiro pode-se consultar Jannuzzi (2005) Jannuzzi (2000), e Saidel (2000).

Uma opção para investimentos dentro do PEE consiste em ações de eficiência em comunidades de baixa renda. Estas ações são realizadas em grande escala pela empresa AES Eletropaulo, atuante na região metropolitana de São Paulo. As ações realizadas pela distribuidora nas comunidades são compostas de oficinas educacionais, *retrofits* de equipamentos, regularizações das ligações clandestinas e reformas internas nos sistemas elétricos das residências.

As ações, para efeito de delimitação de fronteira de medição e escolha de opção de medição (EVO, 2007), podem ser divididas em cinco grupos: (1) regularização e reformas internas, (2) substituição de refrigeradores (geladeiras e *freezers*), (3) substituição de lâmpadas, (4) instalação de coletores solares de aquecimento de água, (5) instalação de sistemas de recuperação de calor. Além destas, existe um sexto grupo que corresponde às (6) ações de caráter não energético nas comunidades.

O grupo (1) corresponde à regularização das ligações clandestinas das unidades consumidoras de baixa renda, com o respectivo cadastramento da residência dentro da carteira de clientes da concessionária e a conseqüente conscientização do respectivo consumidor quanto ao uso adequado e seguro da energia elétrica. Existe também, dependendo de um diagnóstico das condições internas das residências, reformas internas no sistema elétrico residencial, incluindo substituição e instalação de condutores adequadamente dimensionados, instalação de disjuntor DR, sistema de proteção contra surto elétrico DPS, entre outros. Os objetivos referentes a esse grupo de ações são: redução de perdas comerciais, aumento da condição de segurança do local da regularização, redução do consumo elétrico, melhor aproveitamento da matriz energética nacional, preservação ambiental, inclusão social dos respectivos moradores, bem como o aumento da conscientização quanto ao uso adequado e seguro da eletricidade.

O grupo (2) refere-se ao *retrofit* de geladeiras antigas por equipamentos novos mais eficientes, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE/INMETRO 2007). A companhia atua na identificação dos equipamentos antigos, na compra e substituição de novos equipamentos mais eficientes e, de acordo com a legislação pertinente, no transporte e destinação final dos equipamentos substituídos. Esse grupo de ações objetiva a redução do consumo energético desses equipamentos que sofrem perda de eficiência natural resultante de degradação da vedação ao longo da vida útil, deficiências no *setup* do termostato, ou mesmo obsolescência tecnológica. Também é objetivo desta ação a reciclagem e destinação final dos componentes dos refrigeradores substituídos, garantindo a sustentabilidade ambiental do Programa de Eficiência Energética.

O grupo (3) contempla a substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas mais eficientes do tipo fluorescentes compactas (LFC), também de acordo com o PBE. Esse processo de substituição tem por finalidade a redução do consumo de energia elétrica no que se refere à iluminação interna, através da redução da potencia instalada nas unidades consumidoras de baixa renda e através da implementação de tecnologia de iluminação mais eficiente. Assim, como as ações do grupo (2), a substituição de lâmpadas no âmbito do PEE também contempla o descarte adequado das lâmpadas substituídas.

As ações do grupo (4) consistem na instalação de coletores de energia solar para aquecimento de água, com o objetivo da redução de consumo energético dos sistemas elétricos convencionais de aquecimento. O grupo (5), similarmente, corresponde à instalação de equipamentos de recuperação de calor para mesma finalidade. Esses dois grupos objetivam a redução do consumo de energia elétrica para aquecimento de água para banho com a utilização de energia solar quando disponível, e utilização de sistemas de recuperação de calor respectivamente.

Ainda existem as ações do grupo (6) que promovem a eficiência energética de maneira indireta. As ações chamadas não energéticas são compostas de iniciativas educacionais, promovidas nas comunidades, para

conscientizar os moradores sobre os benefícios trazidos pelas melhorias realizadas (cidadania, segurança patrimonial, segurança pessoal, inclusão social promovida pelo acesso regular à eletricidade de qualidade, entre outros). Tais ações, apesar de não terem correlação direta com o consumo energético da comunidade, condicionam a sustentabilidade de toda a ação. As ações são promovidas em escolas públicas de municípios dentro da área de concessão da empresa e também em módulos específicos, como é o caso da tenda itinerante, local onde são realizados jogos e palestras promovendo conscientização e educação quanto à importância da conservação da energia e do meio ambiente.

As ações são realizadas em grande escala, caracterizando um dos maiores desafios em relação à M&V. Isso enseja abordagens estatísticas na tentativa de buscar modelos com convergência significativa para simular consumos *pré-retrofit* e *pós-retrofit*. Caso contrário, o custo de medições e monitoramento para determinação de economias anuais tornaria todo o processo de M&V impraticável, dados os altos custos de monitoramento.

Além disso, o ambiente altamente dinâmico e peculiar dessas comunidades de baixa renda cria dificuldades para a condução de atividades de M&V. Algumas das características dessas comunidades que afetam todo o processo são: a alta rotatividade de moradores, inexistência de qualquer infraestrutura prévia para coleta de dados, inexistência de registros de qualquer natureza, sistema elétrico dessas comunidades altamente complexo (irregular e desordenado), condições de segurança pessoal e patrimonial ruins, entre muitas outras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das referências utilizadas em trabalhos de M&V é o PIMVP (EVO 2007), que em seu primeiro volume trata de Conceitos e Opções para a Determinação da Economia de Energia e de Água. Neste volume são definidas terminologias e boas práticas para medição e documentação de projetos de eficiência energética. A necessidade de gerir contratos de *performance* baseados em planos de M&V previamente acordados origina tal publicação, sendo que as diretrizes do protocolo são aderentes às necessidades dos envolvidos nos contratos de eficiência.

Dentre suas definições, o processo de M&V é caracterizado como o “processo de utilização de medidas para determinar de modo seguro a economia real criada dentro de uma instalação individual por um programa de gestão de energia.”(EVO 2007). Além disso, são definidas as medidas de racionalização de energia (MREs) como medidas que melhoram a eficiência, ou conservam energia ou água, ou de gerenciamento de demanda.

A variável economia por sua vez, não pode ser medida de forma direta, pois representa a ausência de consumo e, assim, ela é medida comparando-se os consumos antes e após a implantação de um determinado programa (considerando ajustes necessários advindos de alterações nos padrões e condições de consumo), muitas vezes com a implementação de modelos analíticos, estatísticos ou de simulação de consumo.

O escopo do presente artigo trata especificamente de uma dos itens da lista de atividades de M&V proposta pelo protocolo que é o desenvolvimento de um método de cálculo e estimativas aceitáveis, propondo uma abordagem metodológica para o levantamento de modelos estatísticos de previsão de consumo.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

Para a quantificação das economias provenientes de ações de eficiência energética em comunidades de baixa renda, propõe-se o uso de uma metodologia de modelagem matemática. Define-se a economia, analogamente ao proposto no protocolo internacional, como qualquer ação para redução do consumo energético de um sistema. Exemplos dessas ações são descritas na seção 2 deste artigo.

A metodologia se inicia com o desenvolvimento de modelos estatísticos capazes de simular o consumo *pré* e *pós-retrofit* de um determinado sistema (uma residência, uma geladeira, ou qualquer outra fronteira de

medição), sendo esse modelo capaz de correlacionar variáveis explicativas com a variável de interesse, a qual é o consumo energético de um sistema. O modelo deve ser resultado de uma campanha de medição em certa quantidade de unidades, nas quais são instalados medidores de energia que coletam o consumo diário durante uma semana. O período de uma semana foi estabelecido por ser este o tempo usual do ciclo energético de uma residência, contudo, podem ser empregados períodos maiores, que acompanham as variações sazonais no consumo devido a alterações climáticas.

Vale ressaltar que essa quantidade de residências que deve ser utilizada para modelagem não deve necessariamente corresponder ao tamanho amostral instruído na NBR 5426/1985, uma vez que o modelo será utilizado para simular o consumo, e a regra de amostragem tem a finalidade de inferência estatística direta.

Considera-se o uso de regressão linear múltipla para a construção dos referidos modelos, nos quais existe uma variável de interesse, ou variável dependente (y), a qual se deseja prever através de outras variáveis (x_i), ditas variáveis explicativas ou variáveis independentes. Isto pode ser visto como uma análise de um processo no qual se tem as variáveis $X=(x_1, x_2, \dots, x_k)$ como inputs e a variável y como output. Deseja-se, portanto, estudar $y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$.

No caso em que se assume um modelo multilinear para explicação de um determinado fenômeno, a função $f(X)$ assume uma forma como a expressão (1).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \varepsilon \quad (1)$$

Em que x_i corresponde a variável explicativa i , β_i é o coeficiente de regressão da variável i , β_0 é o coeficiente independente, também chamado de intercepto do eixo y e ε é o erro do modelo.

Algumas suposições se fazem necessárias para a construção de modelo: (i) a esperança do erro é nula e sua variância é desconhecida e igual a σ^2 , ou seja $E(\varepsilon)=0$ e $VAR(\varepsilon)= \sigma^2$; (ii) os erros entre as variáveis não estão correlacionados entre si; (iii) os erros seguem uma distribuição normal, ou seja $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$; (iv) as variáveis regressoras X assumem valores fixos. Tomando essas premissas, o resultado atingido é que a variável de interesse y , calculada pelo modelo assume a distribuição conforme a expressão (2).

$$\hat{y} \sim N(E(y|X); \sigma^2) \quad (2)$$

Em que $E(y|X)$ é dado pela expressão (3).

$$E(y|X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i \quad (3)$$

Para encontrar o modelo descrito pela expressão (3) pode-se usar o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Para a aplicação do método, supõe-se que exista uma série de dados correspondentes ao vetor de variáveis X e à variável de resposta y , com um total de n observações. Essa série de dados pode ser representada por um vetor $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ com as observações da variável de interesse e uma matriz $X=\{x_{ij}\}$, $i=\{1, 2, \dots, n\}$

e $j=\{1,2,\dots,k\}$, em que cada elemento x_{ij} corresponde ao valor observado da variável x_j na observação i . Uma vez que se deseja estabelecer uma relação linear entre y e as variáveis explicativas x_j , cada linha da série de dados deve atender à expressão (4).

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}) = \beta_0 + \sum_{z=1}^k \beta_z \cdot x_{iz} + \varepsilon_i \quad (4)$$

Resulta num sistema linear que pode ser escrito matricialmente por (5).

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad ; \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

O MMQ consiste na minimização do erro quadrático do modelo. Essa minimização é expressa pela expressão (6).

$$\text{minimizar } L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = Y^T \cdot Y - 2 \cdot \beta^T \cdot X^T \cdot Y + \beta^T \cdot X^T \cdot X \cdot \beta \quad (6)$$

A solução da expressão (6) corresponde a encontrar o vetor de coeficientes β como definido pela expressão (7).

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = -2 \cdot X^T \cdot Y + 2 \cdot X^T \cdot X \cdot \beta = 0 \Leftrightarrow \hat{\beta} = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (7)$$

Uma vez calculado o vetor $\hat{\beta}$ define-se o modelo matemático conforme a expressão (3) que permite a previsão da variável y a partir de observações das variáveis x_j , contudo, deve-se levar em conta que há um erro de previsão decorrente da natureza estatística do modelo. Esse erro médio de previsão pode ser calculado pela expressão (8).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{Y^T \cdot (I - X \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T) \cdot Y}{n - k - 1} \quad (8)$$

Considerando uma observação x_0 , para a qual se deseja prever y , o erro esperado para essa medição pode ser calculado pela construção de um intervalo de confiança em torno da medida prevista y_0 , conforme a expressão (9).

$$y_0 \pm t_{\alpha/2; (n-k-1)} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \cdot x_0^T \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot x_0}$$

(9)

As equações (7) a (9) definem um modelo matemático que explica a variável y baseado nas variáveis explicativas x_0 . Maiores detalhes da modelagem matemática podem ser encontrados em Johnson e Wichern (2007).

De posse do modelo matemático, é possível simular consumos de residências ou de equipamentos dentro delas em situações *pré* e *pós-retrofit*, a depender da variável de interesse y utilizada na construção das equações. Assim, a segunda etapa da metodologia consiste na coleta de variáveis explicativas de residências de baixa renda para simulação de consumos e determinação do comportamento médio da variável de interesse. Recomenda-se que a quantidade de unidades da amostra de simulação seja superior ao tamanho amostral sugerido pela NBR 5426/1985, uma vez que os erros de medida oriundos da utilização de modelos de previsão são maiores que o de um medidor de energia convencional.

Similarmente à construção dos modelos, a simulação dos consumos assume uma série de dados representados por uma matriz X com n observações, a qual será utilizada para determinar diversas previsões de consumo elétrico. Cada linha da matriz x_i corresponde a uma previsão de consumo elétrico para um determinado modelo matemático.

$$x_i \rightarrow f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}) = \hat{y}_i$$

(10)

Os diversos valores previstos definem uma distribuição empírica de consumo energético para a qual podem ser feitas inferências estatísticas. Espera-se que a distribuição resultante se aproxime de uma distribuição normal com desvio padrão desconhecido. Dessa forma, o intervalo de confiança para a média da distribuição com grau de significância $(1-\alpha)$ pode ser determinado pela expressão (11).

$$\bar{\hat{y}} \pm t_{\alpha/2; n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

(11)

Assumindo a construção de dois modelos matemáticos representando os consumos elétricos de um sistema em condições *pré* e *pós-retrofit* respectivamente, o intervalo de confiança para a diferença das médias do consumo pode ser dado pela expressão (12) na qual $n_{pré}$ é o número de observações utilizadas para simular a distribuição de consumo, $n_{pós}$ é o número de observações utilizadas para simulação do consumo *pós-retrofit*, $\bar{y}_{pré}$ é a média da distribuição do consumo *pré-retrofit* e $\bar{y}_{pós}$ é a média da distribuição de consumos *pós-retrofit*, $S_{pré}$ é o desvio padrão da distribuição de consumos *pré-retrofit* e $S_{pós}$ é a distribuição de consumos *pós-retrofit*.

$$(\bar{\hat{y}}_{pré} - \bar{\hat{y}}_{pós}) \pm t_{\alpha/2; n_{pré}+n_{pós}-2} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{pré}^2}{n_{pré}} + \frac{S_{pós}^2}{n_{pós}}\right)}$$

(12)

O intervalo de confiança para a economia de uma medida de racionalização construído pela expressão (12) não leva em consideração os erros de medida decorrentes do uso dos modelos de regressão para simular o

consumo. Faz-se necessária uma análise da propagação desses erros. Conforme apresentado por Vuolo (1992), dada uma grandeza M calculada a partir de duas outras A e B , com erros iguais a σ_A e σ_B respectivamente, o erro propagado no cálculo de M é dado pela expressão (13), que pode ser estendida para um maior número de variáveis.

$$\sigma_M = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial A}\right)^2 \cdot \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial B}\right)^2 \cdot \sigma_B^2} \quad (13)$$

Seja uma linha da matriz de dados de simulação representada por x_0 , o erro esperado dessa previsão $s(x_0)$, uma vez que os dados estejam dentro do universo de dados utilizados para construção dos modelos é dado pela expressão (14).

$$s_{medida}(x_0) = t_{\alpha/2; (n-k-1)} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \cdot x_0^T \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot x_0} \quad (14)$$

Utilizando o conceito de erro esperado e desenvolvendo a expressão (13), tem-se que o intervalo de confiança para a economia pode ser dado pela expressão (15).

$$(\bar{y}_{pré} - \bar{y}_{pós}) \pm t_{\alpha/2; n_{pré} + n_{pós} - 2} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{pré}^2}{n_{pré}} + \frac{S_{pós}^2}{n_{pós}}\right) + \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{pré}} \left(\frac{S_{pré}(x_i)}{n_{pré}}\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_{pós}} \left(\frac{S_{pós}(x_j)}{n_{pós}}\right)^2}} \quad (15)$$

Para a expressão (15), o grau de confiabilidade α deve ser o menor dentre o utilizado na expressão (12) e o utilizado para determinar o intervalo de confiança de cada medida da expressão (14). Maiores referências podem ser encontradas em Vuolo (1992).

Seguindo essa metodologia podem-se determinar as economias de ações de eficiência de maneira consistente, mitigando os altos custos de instalação de medidores de energia em amostras do tamanho sugerido pela atual norma brasileira.

5. APLICAÇÃO E RESULTADOS

A metodologia exposta na seção 4 foi aplicada na determinação de ganhos de eficiência em comunidades de baixa renda dentro da área de concessão da distribuidora AES Eletropaulo. Neste artigo são apresentados apenas exemplos dos resultados, uma vez que sua apresentação integral não caberia a um artigo científico dessa natureza.

Foi realizada uma campanha de coleta de dados, incluindo variáveis explicativas e variáveis de interesse. As variáveis de interesse, que foram coletadas com medidores de energia com memória de massa instalados durante uma semana ou mais nas residências, são relativas às ações de eficiência promovidas pela AES Eletropaulo. Foram levantados os consumos elétricos de refrigeradores, chuveiros, iluminação e de residências como um todo, em residências não regularizadas (sem nenhum tipo de ação de eficiência presente) e em residências regularizadas (com ações de eficiência). As variáveis explicativas selecionadas e coletadas foram: número de habitantes da residência, grau de escolaridade do chefe da família, renda mensal familiar, temperatura máxima e mínima do dia, umidade relativa média do dia, potência instalada nominal total, potência nominal de iluminação, potência nominal máxima do chuveiro e volume e idade do refrigerador. A amostra para levantamento desses dados de modelagem é composta de 25 residências *pré-retrofit*

, 25 residências *pós-retrofit*, 25 refrigeradores *pré-retrofit*, 25 refrigeradores *pós-retrofit*, 25 chuveiros *pré-retrofit*, 25 chuveiros *pós-retrofit*, 25 sistemas de iluminação *pré-retrofit* e 25 sistemas de iluminação *pós-retrofit*.

Foram, portanto, construídos oito modelos matemáticos correlacionando às variáveis de interesse e as variáveis explicativas. Cabe ressaltar que os modelos de consumo foram construídos tomando o consumo em base diária e a significância adotada para a construção dos intervalos de confiança das previsões foi de 80%. As expressões (16) e (17) apresentam os modelos matemáticos referentes ao consumo de refrigeradores *pré* e *pós-retrofit* respectivamente.

$$Con_{ref-pós}(X) = 0.2377 + 0.016018 \cdot NM - 0.063719 \cdot GE + 0.020509 \cdot T_{min} + 0.011987 \cdot T_{max}$$

$$S_{Con_{ref-pós}} = 0.102263$$

(16)

$$Con_{ref-pré}(X) = -3.7646 + 0.70944 \cdot RM + 0.07163 \cdot T_{min} + 0.027192 \cdot Id_{Ref} + 0.0090204 \cdot Vol_{Ref}$$

$$S_{Con_{ref-pré}} = 0.351256$$

(17)

A equação (16) descreve as principais variáveis que explicam o consumo energético de refrigeradores *pós-retrofit*. A equação mostra uma grande influência das variáveis ambientais (Temperatura Máxima Diária T_{max} e Temperatura Mínima Diária T_{min}) como é usual em equipamentos de refrigeração. Outro fator que determina o consumo desses equipamentos é o número de moradores da residência NM , fato que possivelmente é explicado pela maior quantidade de abertura de portas em residências com mais pessoas. Outro fator é o grau de escolaridade do chefe da família GE , sendo que quanto maior essa variável, menor o consumo do equipamento. O volume do refrigerador seria outra variável determinante, porém, uma vez que todos os refrigeradores *pós-retrofit* possuem volumes similares (de acordo com o programa de substituição da concessionária), essa grandeza não é evidenciada numa regressão multilinear. Raciocínio análogo pode ser empregado para explicar a não influência da idade dos refrigeradores *pós-retrofit* na equação que descreve seu consumo.

A expressão (17) descreve o consumo de refrigeradores *pré-retrofit*. Observa-se que quanto maior a renda mensal familiar RM , maior é o consumo do equipamento, possivelmente devido a maior de abertura de portas. Existe também a influência da variável ambiental Temperatura Mínima Diária T_{min} , usual de equipamentos de refrigeração. A idade Id_{Ref} e o volume Vol_{Ref} dos equipamentos são condicionantes para seu desempenho energético, já que quanto maior o volume e a idade do refrigerador, maior seu consumo de eletricidade, e vice-versa.

Os modelos matemáticos, como os exemplificados pelas expressões (16) e (17) foram testados quanto sua linearidade por uma análise de variância, mostrando correlação linear com grau de significância apropriado.

Paralelamente à coleta de dados de modelagem, foi realizada uma coleta de dados para simulação de consumo. Foram coletadas as mesmas variáveis explicativas em 520 residências randomicamente selecionadas em todo o território do município de São Paulo. A Figura 2 ilustra o consumo simulado *pré* e *pós-retrofit* de residências como um todo, comparados com uma distribuição normal de probabilidade.

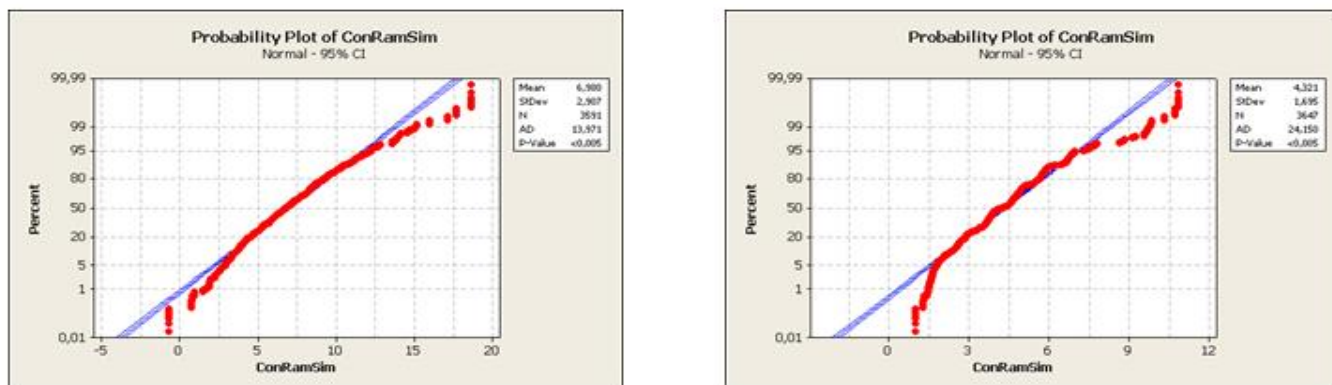


Figura 2 – Distribuição de consumos simulados *pré* e *pós-retrofit* em residências de baixa renda

Pode-se observar que o comportamento dos consumos simulados, *pré* e *pós-retrofit*, aderem significativamente à distribuições normal de probabilidade. Esse comportamento pode ser também visto na Figura 3 que apresenta o consumo simulado de chuveiros *pré-retrofit*.

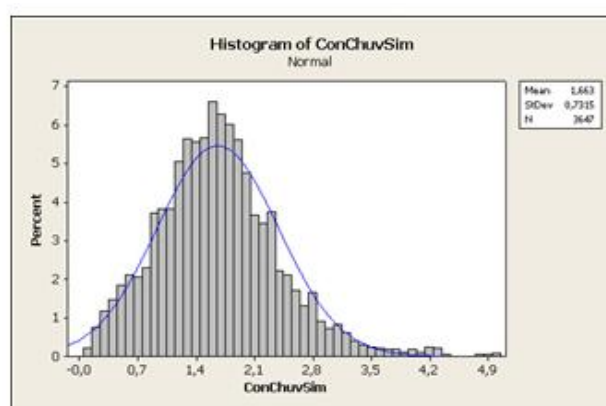


Figura 3 – Histograma de distribuição de consumo energético de chuveiros *pré-retrofit*

Essas distribuições podem, de acordo com a metodologia, ser utilizadas para a construção de intervalos de confiança para as economias. A Tabela 1 apresenta esses intervalos de confiança para as economias, calculados pela metodologia, já considerando os erros de previsão decorrentes do uso do modelo.

Os intervalos de confiança da Tabela 1 foram construídos com significância de 99%, contudo, prevalece a significância com a qual foram construídos os intervalos de confiança das previsões de 80%.

Observa-se que todas as ações de eficiência geram economias significativas de energia, em geral acima de 38%. Também pode ser observado que os valores para os desvios calculados são substancialmente pequenos, considerando a variabilidade do fenômeno de consumo elétrico em comunidades de baixa renda, e a própria heterogeneidade das residências em diferentes comunidades.

Tabela 1 – Resumo das economias obtidas pelas ações de eficiência determinadas pela metodologia proposta

Medida de Racionalização de Energia	Consumo <i>Pré</i>	Desvio Indiv.	Consumo <i>Pós</i>	Desvio Indiv.	Economia	Desvio	Desvio (%)
Regularização (Ramal)	6,98	± 0,58	4,32	± 0,30	2,66	± 0,17	7%
Refrigerador	1,93	± 0,18	0,76	± 0,03	1,17	± 0,05	4%
Chuveiro	1,66	± 0,14	0,73	± 0,06	0,93	± 0,04	5%
Lâmpadas	0,65	± 0,05	0,3	± 0,08	0,35	± 0,02	5%

* Valores em kWh/dia

3. Conclusões

Os resultados apresentados neste artigo indicam que a metodologia proposta possui validade para o objetivo de quantificar as economias de projetos de eficiência energética em comunidades de baixa renda. Com o uso das ferramentas estatísticas foi possível o desenvolvimento de modelos de previsão de consumo de sistemas *pré e pós-retrofit*, que por sua vez foram utilizados para a construção de histogramas de consumo energético. Por fim, foi possível a determinação de intervalos de confiança para as economias provenientes de diversas ações de eficiência em comunidades.

Os intervalos de confiança definidos apresentaram desvios aceitáveis com significância igualmente aceitável. Isso resulta numa definição de economias para cada ação de eficiência em comunidades de maneira mais precisa que os atuais métodos de estimação.

A amostra utilizada para determinação do modelo pode ser menor que o recomendado pela atual norma brasileira para definição de tamanhos amostrais. Por outro lado, recomenda-se que o tamanho amostral de unidades para coleta de variáveis explicativas para posterior construção dos histogramas de consumo seja maior que o recomendado pela norma, uma vez que a convergência esperada para essa amostra é prejudicada pelo uso de modelos de previsão de consumo, com um erro associado significativamente maior que o de medidores de energia convencionais.

A abordagem proposta resulta em processos de M&V com custos reduzidos, pois as variáveis mais caras de serem coletadas (consumos), são levantadas em um número reduzido de unidades, e as variáveis cujo levantamento é mais barato, podem ser coletadas em um número grande de unidades consumidoras. Isso é feito sem prejuízo da análise resultante do processo estatístico de determinação de economias.

4. Referências bibliográficas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, SPE – Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética. Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5426: Planos de amostragem e procedimentos de inspeção – elaboração. Rio de Janeiro, 1985.

EVO – Efficiency Valuation Organization. International Performance Measurement and Verification Protocol – Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings, Vol 1. 2007.

GINESTET, S., MARCHIO, D. Retro and on-going commissioning tool applied to an existing building: Operability and results of IPMVP. Energy 35 p 1717 - 1723, 2010.

- JANNUZZI, G. D. M. Energy efficiency and restructuring of the brazilian power sector. Energy for Sustainable Development vol 4 n° 2 p 17-22, 2000.
- JANNUZZI, G. D. M. Power sector reforms in Brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities. Energy Policy 33 p 1753-1762, 2005.
- JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. Applied Multivariate Statistical Analysis - 6ª Edition. Pearson Education Inc. New Jersey, USA, 2007.
- KAISER M. J., PULSIPHER, A. G. Preliminary assessment of the Louisiana Home Energy Rebate Offer program using IPMVP guidelines. Applied Energy 87 p 691 – 702, 2010.
- PAN, Y., HUANG, Z., WU, G. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. Energy and Buildings 39 p 651 – 657, 2007.
- PBE/INMETRO. National labeling program. National Institute of Metrology. Standardization and Industrial Quality; 2007. www.inmetro.gov.br [acessado 12.11.11].
- SAIDEL, M. A., LIMA, W. S., TOLEDO, L. M. A. Contributions on efficiency energy regulations in Brazil – A comparative study. World Renewable Energy Congress VI, 2000.
- SPALDING-FECHER, R., CLARK, A., DAVIS, M., SIMMONDS, G. The economics of energy efficiency for the poor – a South African case study. Energy 27 p 1099 – 1117, 2002.
- VINE, E., RHEE, C. H., LEE, K. D. Measurement and evaluation of energy efficiency programs: California and South Korea. Energy 31 p 1100 – 1113, 2006.
- VUOLO, J. H. Fundamentos da Teoria de Erros, Editora Edgard-Blucher Ltda, São Paulo, 1992.
-